

基于热力学试验和数值方法的非线性衬里材料性质

刘铭刚¹, 闫怡飞², 闫涛³, 宋胜利⁴, 周晓奇⁴, 杨秀娟¹, 闫相祯¹

- (1. 中国石油大学(华东) 储运与建筑工程学院, 山东 青岛, 266580;
2. 中国石油大学(华东) 机电工程学院, 山东 青岛, 266580;
3. 中国炼化工程股份有限公司, 北京, 100101;
4. 中国石油化工集团公司中原油田分公司, 河南 濮阳, 457001)

摘要: 通过物理试验和数值试验对衬里材料热-力学性质进行研究。对工业上测定高温、内压作用下的大型衬里设备材料导热系数时不能有效模拟环境载荷及升保温控制的问题, 设计实际可行的室内升保温试验, 对衬里材料在设备高温运行状态下导热性质进行研究。通过力学试验研究衬里材料力学性质和强度破坏形式, 讨论衬里材料力学性质随围压的变化规律。将物理试验参数下的耦合数值试验结果与规范对比。研究表明: 室内升保温试验和力学试验可作为衬里材料传热特性和力学性质参数获取的方案, 为数值试验模拟实际工况提供数据支持; 当金属质量分数升高时, 同等围压条件下的衬里材料抗压强度有明显提高; 当金属质量分数一定时, 衬里抗压强度随着围压的增大而提高; 随着围压增大, 衬里弹性模量和本构曲线的斜率都增大, 应力极值也相应提高, 且在达到应力峰值后, 轴向应力平缓下降, 径向应力则逐渐趋于平稳; 衬里层整体内侧受压, 外侧受拉, 具有应力不对称特征。物理试验与数值试验相结合是研究衬里材料热-力学性质的有效方法。

关键词: 衬里材料; 升保温试验; 力学试验; 导热系数; 数值试验

中图分类号: TB302; TQ050.4

文献标志码: A

文章编号: 1672-7207(2018)01-0047-08

Study on physical properties of nonlinear lining material based on thermal-mechanical tests and numerical simulation

LIU Minggang¹, YAN Yifei², YAN Tao³, SONG Shengli⁴, ZHOU Xiaoqi⁴, YANG Xiujuan¹, YAN Xiangzhen¹

- (1. College of Pipeline and Civil Engineering, China University of Petroleum, Qingdao 266580, China;
2. College of Electromechanical Engineering, China University of Petroleum, Qingdao 266580, China;
3. Sinopec Engineering (GROUP) Co., LTD, Beijing 100101, China
4. Petroleum Engineering Technology Research Institute of Zhongyuan Oilfield. Sinopec, Puyang 457001, China)

Abstract: The thermal-mechanical properties of lining material were studied by physical tests and numerical simulation. Indoor heating-insulating test was designed to measure the thermal properties of lining material under the condition of high temperature, and the mechanical properties and failure mode of the liner with the confining pressure changing were studied by mechanical test. The thermal-mechanical numerical simulation based on the physics test result was conducted and compared with the standard regulation in ASME. The results show that the indoor heating-insulating test and mechanical test can be taken as ways to get the heat-transfer characteristics and mechanical properties of the lining

收稿日期: 2017-01-08; 修回日期: 2017-03-16

基金项目(Foundation item): 中国博士后科学基金资助项目(2017M612375); 国家自然科学基金资助项目(51374228); 国家科技重大专项(2016ZX05017-003) (Project(2017M612375) supported by Postdoctoral Science Foundation of China; Project(51374228) supported by the National Natural Science Foundation of China; Project(2016ZX05017-003) supported by the National Key Technology)

通信作者: 闫怡飞, 博士, 从事油气安全工程、储气库安全研究; E-mail: yanyf163@163.com

material and provides data support to the simulation of real condition on numerical method. The compressive strength of lining material is improved significantly when the metal content increases and the compressive strength increases when the confining pressure increases with the metal content fixed. As the confining pressure increases, the elasticity modulus and the curve slope of constitutive increases, and the maximum stress increases correspondingly. When the stress reaches the peak, the axial stress gradually falls and radial stress gradually stabilizes. The inner layer is under pressure and the outer is under tension and it has a stress asymmetry. Combining physical testing with numerical simulation is an effective method for the study of lining material properties.

Key word: lining material; heating-insulating test; mechanical test; thermal conductivity; numerical simulation

炼化工业上的衬里结构是一种导热性能和力学性能均有非线性特征的复合材料^[1]。流化床催化裂化装置、甲醇制烯烃装置及灰熔聚流化床粉煤加压气化装置等设备壳体内壁面都敷设衬里来实现容器内部构件的耐高温性能。近年来,由于隔热衬里失效造成的高温装置整体失效的事件屡屡发生,而国内外学者对耐高温非线性材料传热性能和热力学性质的研究主要是孤立的传热试验和力学试验,如 ROBIN^[2]对耐火衬里材料的热力学性质进行了研究,得出耐高温复合材料具有单轴非线性本构关系的结论;BOISSE等^[3]对耐高温衬里材料在温度载荷下的力学行为进行了数值试验,得到了衬里材料在温度载荷下的失效形式;POIRIER^[4]对耐高温衬里材料的传热性能开展了数值模拟并进行了试验验证,证明了数值试验中引入物理试验参数进行衬里材料性质研究的可行性;美国压力容器标准 ASME VIII/Division-1^[5]对高温高压设备衬里层的敷设标准进行了规定。国内学者在耐高温衬里材料研究领域起步较晚,张荣克等^[6-8]对敷设有隔热衬里层的高温设备壁温和散热规律进行了研究;王教方等^[9]对多次复合材料导热系数测定进行了试验探索;严云^[10]对催化裂化装置中应用的隔热耐磨衬里的物理性质和隔热性能进行了介绍,并对国外规范中的设计取值进行了研究;冯清晓等^[11-12]针对我国炼油化工装置中的衬里材料热力学性质进行了数值试验研究,但其参数取值都来源于国外工业设计规范,尤其是衬里导热系数、失效准则缺乏实际试验数据的支撑。本文作者从耐高温衬里材料的传热特性和力学性质^[13-18]2方面入手,设计室内导热系数测定试验模拟实际工况下衬里材料的传热特性,设计力学试验研究单轴和三轴条件下衬里材料的力学性质,利用热-力学耦合数值试验将二者结合,并将数值模拟结果与 ASME VIII/Division-1 中的相同算例进行误差对比。

1 导热系数测定试验

1.1 试验理论

控制方程^[8-9]为

$$\frac{\partial(\rho c T)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + S \quad (1)$$

式中: ρ , c 和 λ 分别为衬里结构层的密度、比热容和导热系数; S 为衬里结构层的辐射换热源项,由辐射传热计算得到。

材料交界面满足连续条件:

$$T|_{x=x_{h-0}} = T|_{x=x_h+0} \quad (2)$$

$$-\left(\lambda_m \frac{\partial T}{\partial x} \right) \Big|_{x=x_h} = -\left(\lambda_l^h \frac{\partial T}{\partial x} \right) \Big|_{x=x_h} + q_r \quad (3)$$

式中: x_h 为沿厚度的位置坐标; λ_m 为金属导热系数; λ_l^h 为衬里导热系数; q_r 为衬里结构层和金属结构层间沿厚度方向的辐射热流密度。

第一类边界条件为:

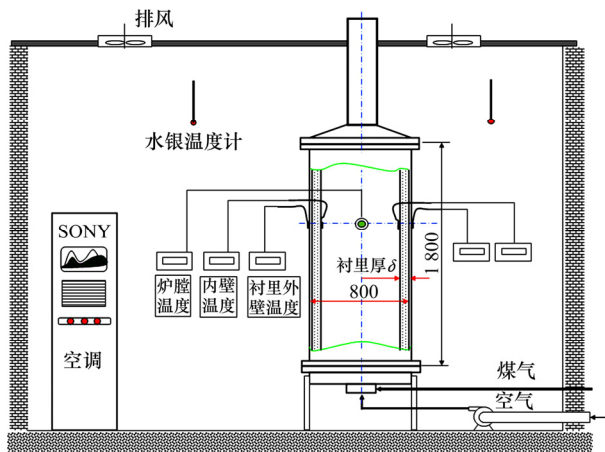
$$\frac{\partial T(x,t)}{\partial t} \Big|_{x=0} = 0, t > 0 \quad (4)$$

$$T(x,t) \Big|_{x=H} = T_w, t > 0 \quad (5)$$

式中: T_w 为衬里结构层内侧高温面温度; H 为衬里-金属复合结构总厚度。

1.2 室内试验

传统材料导热系数测定方法^[10]无法有效地对高温、内压作用下的大型衬里设备进行环境载荷模拟和升保温控制,为此,本文设计了工业上可行的室内升保温试验,对常用衬里材料在设备运行状态下的导热性质进行测定和研究。试验面积在约 20 m² 的室内进行。室内配备有 3P 和 1.5P 的空调各 1 台,以便控制室温。试验装置如图 1 所示。



数据单位: mm

图 1 室内升温保温试验装置示意图

Fig. 1 Schematic of temperature rise & insulation indoor test

试件用 WHL-3A 型号衬里材料制成, 金属(0Cr13 不锈钢)质量分数为 2%~4%, 衬里铺设厚度选取 100~150 mm, 各制成 1 个炉体。室内温度控制在 25~35 °C 之间, 升温 and 加热时间为 12.0~12.5 h。在炉膛温度为 500, 650 和 750 °C 下分别恒温 2 h, 当壁温比较稳定时, 记录各点温度。表 1 所示为衬里-金属结构试件参数。

表 1 衬里-金属结构试件参数

Table 1 Parameters of lining-metal structure specimen

序号	厚度 δ/mm	衬里层		
		预估导热系数 ($\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{C}^{-1}$)	金属质量分数 (纤维和锚固钉)%	体积/ m^3
1	100	0.4~0.5	2~4	0.364
2	110	0.4~0.5	2~4	0.429
3	120	0.4~0.5	2~4	0.451
4	130	0.3~0.4	2~4	0.524
5	140	0.5~0.6	2~4	0.544
6	150	0.3~0.4	2~4	0.575

1.3 试验结果及讨论

表 2 所示为不同衬里厚度下衬里传热试验的结果数据。记 t_{cp} 为内外表面温度的算术平均值^[14], 通过试验数据计算衬里结构的导热系数^[11-13], 如表 3 所示。得到的导热系数与 t_{cp} 拟合关系为

$$\lambda = 1000 \times (0.0005t_{cp} + 0.2311)$$

衬里隔热效果随厚度和试验温度变化如图 2 所示。从图 2 可以看出: 衬里结构隔热效果随厚度增加而提高; 当炉膛温度为 750 °C 时, 衬里厚度从 100 mm

表 2 不同衬里厚度下衬里传热试验结果

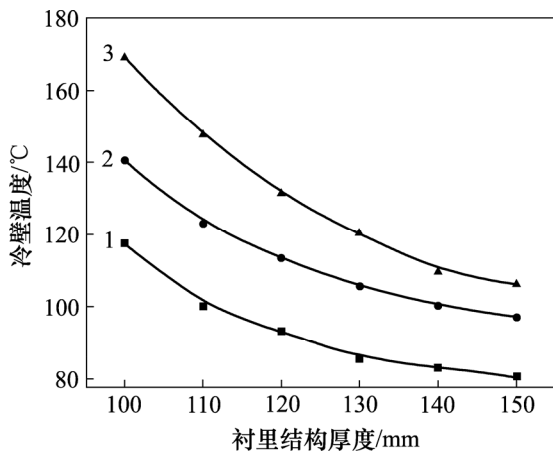
Table 2 Heat test results under different lining thicknesses of lining

编号	衬里厚度/ mm	环境温度/ °C	炉膛温度/ °C	热壁温度/ °C	冷壁温度/ °C	加热时间/ h
1	100	26.2	502.5	458.2	117.6	12.5
		32.3	653.2	602.5	140.6	
		34.7	752.1	714.5	169.0	
2	110	30.5	502.1	450.2	100.2	12.5
		33.4	647.3	578.2	123.1	
		32.5	758.2	705.1	147.4	
3	120	28.3	500.6	450.6	93.2	12.5
		32.6	653.7	596.7	113.3	
		32.5	767.6	714.6	131.0	
4	130	26.4	503.4	467.8	85.7	12.5
		30.5	653.5	612.4	105.6	
		32.2	750.3	719.0	120.4	
5	140	26.1	503.7	457.3	83.2	12.5
		28.0	653.4	617.4	100.3	
		32.3	751.6	719.1	109.5	
6	150	28.5	501.5	460.6	80.7	12.5
		32.5	651.4	613.7	97.1	
		34.4	749.3	714.5	106.2	

表 3 试验测得衬里材料 WHL-3A 导热系数

Table 3 Thermal conductivity of lining material WHL-3A by test

厚度/mm	平均温度/°C	导热系数/($\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$)
100	278	0.363
	355	0.416
	431	0.455
110	272	0.351
	358	0.398
	426	0.425
120	261	0.288
	354	0.310
	417	0.398
130	275	0.274
	360	0.319
	422	0.345
140	276	0.342
	367	0.392
	432	0.470
150	365	0.309
	428	0.370



炉膛温度/°C: 1—500; 2—650; 3—700。

图 2 不同炉温下衬里隔热效果随厚度变化规律

Fig. 2 Insulation of lining with thickness variation under different furnaces

增大到 150 mm, 冷壁温度降低了 38%; 从图 2 还可以看出: 随着衬里厚度增加, 冷壁温度受炉膛温度升高的影响明显减弱。

2 力学试验

2.1 试验准备和参数

单轴试验使用“衬里+金属”复合结构的立方体试样, 试样总厚度为 160 mm(其中衬里厚度为 120 mm, 金属厚度为 40 mm), 长和宽均为 100 mm。5 组试验的试样参数如表 4 所示, 金属质量分数为 2%~4%, 围压为 0~30 MPa, 采用轴向加载直至衬里层破坏。

表 4 拉压试验参数

Table 4 Parameters of tension and compression test

编号	金属质量分数/%	(衬里+金属厚度)/mm
1	2.0	120+40
2	2.5	120+40
3	3.0	120+40
4	3.5	120+40
5	4.0	120+40

三轴试验采用直径×长度为 100 mm×120 mm 的圆柱坯制试样, 钢丝质量分数为 2%~4%。试验使用位移控制加载, 以 0.005 mm/s 的载荷速度同时施加围压和轴向压力至预定围压。采用 5 mm 位移传感器测量试样的轴向位移, 以 0.005 mm/s 的载荷速度施加轴向载荷直至试件破坏。围压工况如表 5 所示。

表 5 试验围压水平

Table 5 Confining pressure of test

试样编号	围压/MPa	试样编号	围压/MPa
1	15	10	30
2	20	11	35
3	25	12	40
4	30	13	15
5	35	14	20
6	40	15	25
7	15	16	30
8	20	17	35
9	25	18	40

2.2 试验结果讨论

2.2.1 破坏形式

力学试验中衬里材料的破坏形式以边裂和中部微裂为主, 如图 3 所示, 这是由衬里在载荷作用下受拉区和受压区分布位置决定的。

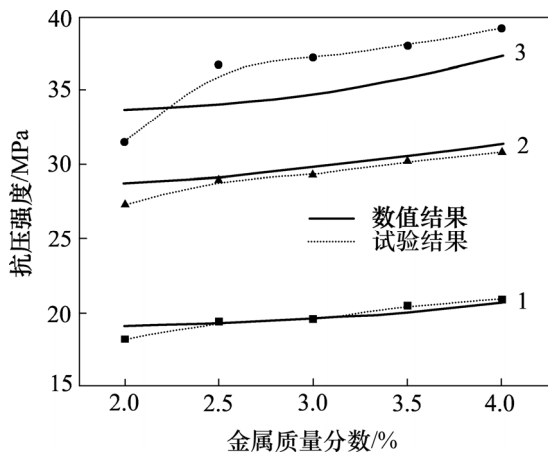


图 3 衬里材料破坏形态示意图

Fig. 3 Lining material destruction in test

2.2.2 抗压强度

图 4 所示为不同金属含量与衬里抗压强度的关系曲线及围压对抗压强度的影响。从图 4 可以看出: 当围压为 0, 20 和 30 MPa 时, 衬里抗压强度相比金属质量分数为 0 的衬里分别提高了 7.5%, 8.1%和 8.9%, 说明金属质量分数升高时, 同等围压条件下的衬里材料抗压强度有明显提高。从图 4 还可以看出: 当金属质量分数为 3.5%时, 随着围压从 0 MPa 增加到 20 MPa, 衬里抗压强度提高了 52%; 当围压从 20 MPa 增加到 30 MPa 时, 抗压强度提高了 27%, 说明当金属质量分数一定时, 衬里抗压强度随着围压的增大而增大。



围压/MPa: 1—0; 2—20; 3—30。

图4 金属含量对抗压强度的影响

Fig. 4 Influence of metal content on compressive strength

2.2.3 弹性模量

图5所示为试验测得弹性模量随围压的变化曲线。从图5可以看出: 围压从0 MPa增大到40 MPa过程中, 衬里材料弹性模量从26.25%提高到75.23%, 说明随着围压增大, 衬里弹性模量将显著增大。

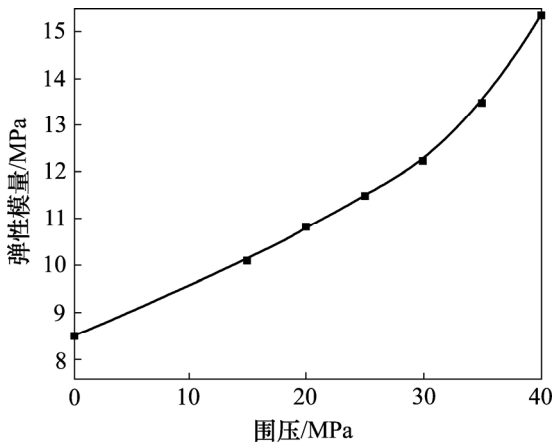


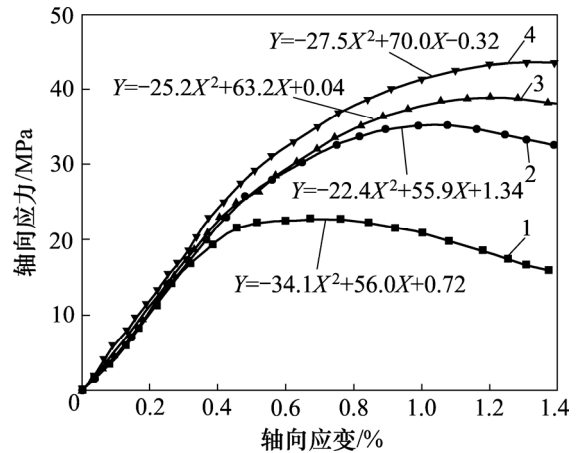
图5 弹性模量随围压变化曲线

Fig. 5 Elastic modulus change with confining pressure

2.2.4 本构关系

图6所示为衬里试件轴向应力与轴向应变的关系曲线。从图6可以看出: 在试件受轴向荷载的初始阶段, 本构曲线表现为线性关系; 随着围压增大, 材料本构曲线斜率增大, 轴向应力极值也相应提高; 随着轴向荷载增大, 无围压工况的应力首先达到极值; 对有围压工况, 在达到应力峰值后, 本构曲线呈平缓下降趋势。图7所示为泊松比0.4时轴向应力与径向应

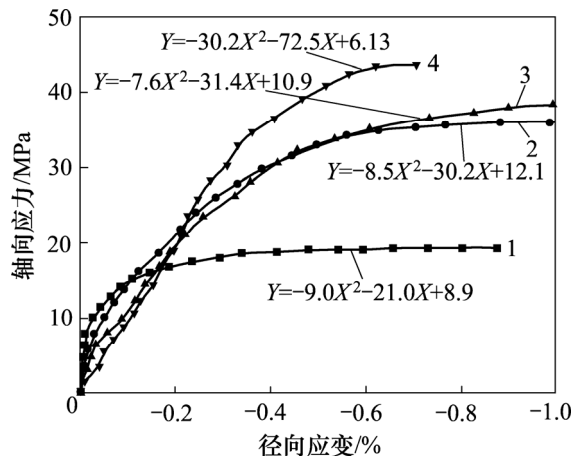
变的关系曲线。从图7可以看出: 本构曲线的斜率和峰值随着围压增大而增大; 当围压一定时, 本构曲线随径向应变的增大到达极值后逐渐趋于平稳。



围压/MPa: 1—0; 2—20; 3—30; 4—40。

图6 轴向应力与轴向应变关系

Fig. 6 Relationship between axial stress and axial strain



围压/MPa: 1—0; 2—20; 3—30; 4—40。

图7 轴向应力与径向应变关系

Fig. 7 Relationship between axial stress and radial strain

3 数值试验和算例

3.1 强度准则

经过2.2.3节的讨论可知: 衬里材料为准脆性类混凝土材料, 其力学性质具有非线性和典型的拉压不对称性, 因此, 可取材料拉压应力当量为

$$\begin{cases} \sigma_{拉} = \sigma_1 - \mu(\sigma_2 + \sigma_3) \\ \sigma_{压} = |\sigma_3 - \mu(\sigma_1 + \sigma_2)| \end{cases} \quad (6)$$

当满足 $\sigma_{拉} \geq \sigma_{许用拉应力}$ 或 $\sigma_{压} \geq \sigma_{许用压应力}$ 时, 即

认为衬里材料应力发生强度破坏^[19-20]。其中, σ_1 , σ_2 和 σ_3 为衬里材料在拉压应力下的 3 个主应力^[21-22], μ 为泊松比; $\sigma_{拉}$ 和 $\sigma_{压}$ 分别为衬里材料拉、压应力当量, $\sigma_{许用拉应力}$ 和 $\sigma_{许用压应力}$ 分别为衬里材料许用拉应力和许用压应力。

3.2 算例应用

利用上述升保温试验和力学试验得到的导热系数和力学参数, 建立美国压力容器标准 ASME VIII /Division-1 中参考算例的数值模型, 模型尺寸采用升保温试验的厚度结构 120 mm(衬里)+40 mm(金属)。线胀系数随温度变化参照 GB 50474—2008^[23], 如图 8 所示。计算工况和约束如下: C02 衬里抗拉强度为 5 MPa、抗压强度为 35 MPa; 衬里层内表面温度为 750 °C, 金属层外表面与大气接触温度为 20 °C; 金属壳体内表面 0.35 MPa 均布压力, 封头端面施加对称约束, 立壁底部端面施加垂向约束; 忽略衬里材料许用

应力随温度的变化, 数值模型如图 9 所示。衬里层拉、压应力计算结果如图 10 所示。数值结果与 ASME 规范中算例结果的对比曲线如图 11 所示。

衬里层拉压应力分布如图 10 所示(受拉区为蓝色曲线, 受压区为红色曲线)。从图 10 可以看出: 衬里层应力分布存在明显的拉压不对称情况, 即衬里层内侧受压, 最大压应力为 16.5 MPa, 小于材料的抗压极限 35 MPa, 未出现压裂破坏; 衬里层外侧受拉, 最大拉应力为 5.67 MPa, 超出材料抗拉极限 5 MPa, 超出区域出现拉裂破坏, 衬里层外侧占厚度 42%(50 mm) 范围内试件为受拉破坏。衬里材料受压区数值计算结果与 ASME 中的算例结果对比最大相对误差为 8.5%, 平均相对误差为 8.2%; 受拉区最大相对误差为 8.9%, 平均相对误差为 5%, 满足 ASME VIII/Division-1 中规定的容许误差范围。

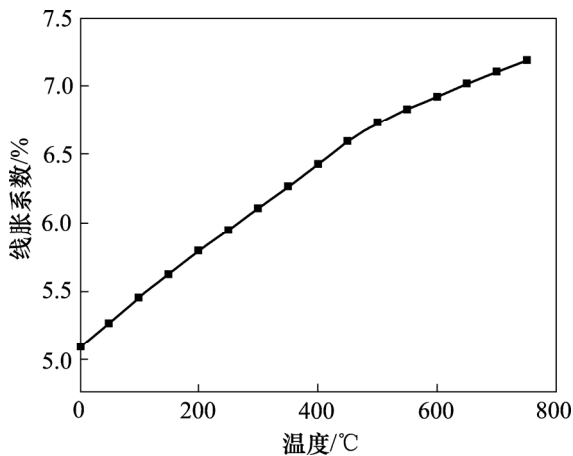


图 8 线胀系数随温度变化曲线

Fig. 8 Linear expansion coefficient with different temperatures

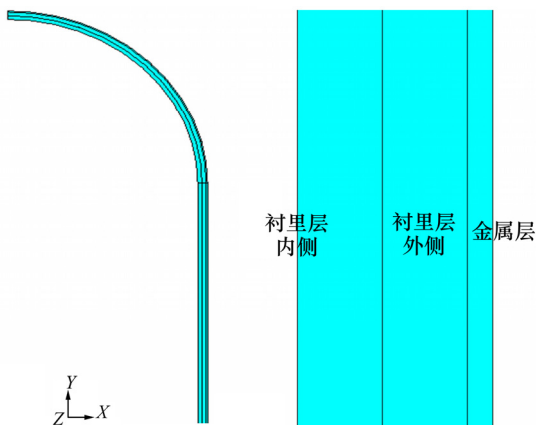
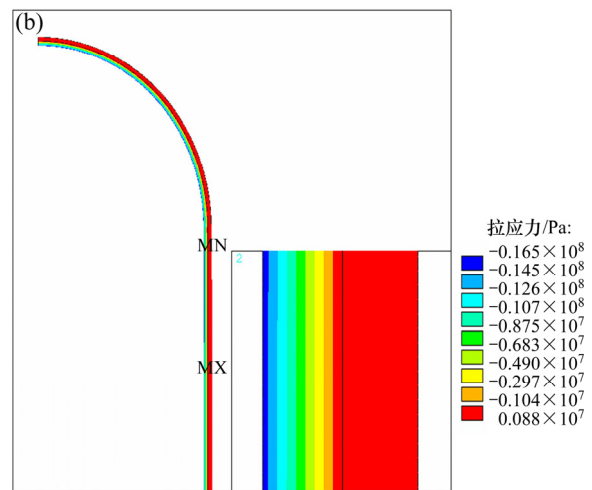
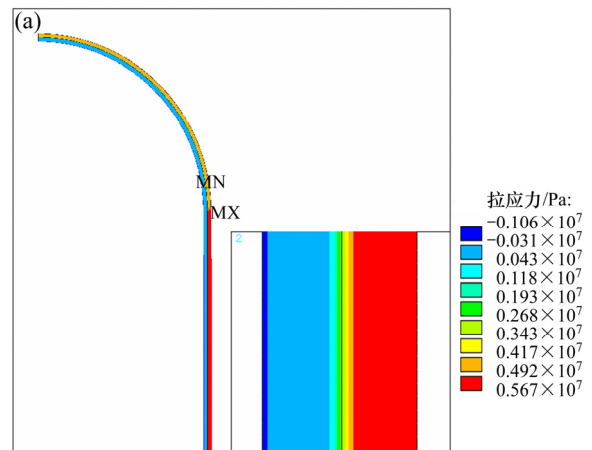


图 9 典型带封头衬里设备有限元模型

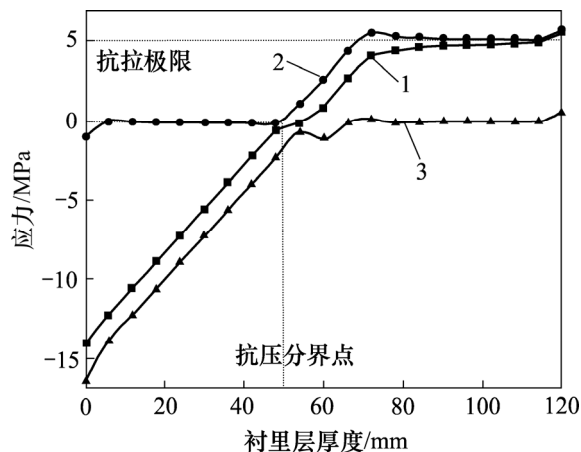
Fig. 9 Finite element model of typical head lining device



(a) 衬里层拉应力分布图; (b) 衬里层压应力分布图

图 10 衬里层拉应力和压应力分布图

Fig. 10 Tensile and lining layer compressive stress distribution of lining layer



1—试验测得径向应力曲线; 2—数值计算径向拉应力;
3—数值计算径向压应力。

图 11 衬里层拉压应力实验与数值结果对比

Fig. 11 Test and numerical results of lining tensile and compressive stress of lining layer

4 结论

1) 衬里的室内升保温试验可有效模拟环境载荷并升保温控制, 其结果为衬里材料导热系数测定和热力学特性研究提供数据支持; 衬里的力学试验对材料抗压强度、弹性模量及本构关系进行了研究, 为衬里材料力学性质研究提供了物理参数支持; 基于 ASME 算例的数值试验条件, 衬里材料内侧受压, 外侧受拉, 呈现明显的应力不对称特征。

2) 当金属质量分数升高时, 同等围压条件下的衬里材料抗压强度有明显提高; 当金属质量分数一定时, 衬里抗压强度随着围压的增大而增大。随着围压的增大, 衬里弹性模量将显著增大。在试验条件下, 随着围压增大, 材料本构曲线斜率增大, 应力极值也相应提高, 且在达到应力峰值后, 轴向应力呈平缓下降趋势, 径向应力则逐渐趋于平稳。

3) 力学试验与数值试验相结合是研究衬里材料热-力学性质的有效方法, 该方法满足 ASME VIII/Division-1 中规定的容许误差范围要求。

参考文献:

[1] 刘铭刚, 杨秀娟, 闫相祯, 等. 准脆性高温设备衬里材料热固耦合应力研究及计算[J]. 炼油技术与工程, 2015, 45(1): 43-48. LIU Minggang, YANG Xiujuan, YAN Xiangzhen, et al. Study on thermo-mechanical characteristics of quasi-brittle lining

materials in high-temperature equipment and numerical simulation[J]. Petroleum Refinery Engineering, 2015, 45(1): 43-48.

- [2] ROBIN J M. Thermomechanical behaviour of magnesia-Carbon refractories[J]. British Ceramic Transactions, 1998, 97(1): 1-10.
- [3] BOISSE P, GASSER A. Computations of refractory linings structures under thermal loadings[J]. Advances in Engineering Software, 2002, 33: 487-496.
- [4] POIRIER J. Thermomechanical simulation of refractory linings-an overview[J]. Refractories Applications and News, 2003, 8(6): 16-22.
- [5] ASME VIII, Division 1-rules for construction of pressure vessels[S].
- [6] 张荣克. 催化裂化装置再生系统设备壁温及散热计算[J]. 石油化工设备技术, 1999, 20(2): 1-7. ZHANG Rongke. Wall temperature and heat radiation calculation of regeneration system equipment of catalytic cracker[J]. Petro-Chemical Equipment Technology, 1999, 20(2): 1-7.
- [7] 顾比伦. 隔热耐磨衬里管道的应力分析方法[J]. 石油化工设备技术, 2010, 31(6): 15-18. GU Bilun. Stress analysis method for piping systems with refractory wear-proof lining[J]. Petro-Chemical Equipment Technology, 2010, 31(6): 15-18.
- [8] 胡书君. 衬里管道的应力分析[J]. 化工设计, 2004, 14(2): 11-19. HU Shujun. Stress analysis of lined pipeline[J]. Chemical Engineering Design, 2004, 14(2): 11-19.
- [9] 王教方, 岳贤军, 宋淑珍, 等. 多层复合材料导热系数测定方法的研究[J]. 山东建材学院学报, 2000, 14(3): 258-260. WANG Jiaofang, YUE Xianjun, SONG Shuzhen, et al. The research of determine method for the thermal conductivity of many multiple materials[J]. Journal of Shandong Institute of Building Materials, 2000, 14(3): 258-260.
- [10] 严云. 催化裂化装置用隔热耐磨衬里的现状和发展趋势[J]. 耐火材料, 2000, 34(6): 356-358. YAN Yun. Current situation and developing trend of insulating and wearing-resistant concrete lining for fluid catalytic cracking units[J]. China's Refractories, 2000, 34(6): 356-358.
- [11] 冯清晓, 闫涛. 我国炼油化工装置设备隔热耐磨衬里技术与国外的差异[J]. 石油化工设备技术, 2012, 33(3): 13-18. FENG Qingxiao, YAN Tao. Difference between domestic heat-insulating and wear-resisting lining technology and foreign technology in petrochemical units[J]. Petrochemical Equipment Technology, 2012, 33(3): 13-20.
- [12] 闫涛. 大型催化裂化装置带衬里内集气室的强度及安全可靠性研究[D]. 青岛: 中国石油大学(华东)储运与建筑工程学院, 2013: 20-26.

- YAN Tao. Strength and safe reliability analysis of refractory lining internal plenum in large-scale FCC units[D]. Qingdao: China University of Petroleum (EastChina College of Pipeline and Civil Engineering), 2013: 20–26.
- [13] 王辉, 徐明海. 热流体循环防蜡工艺数值模拟及参数优选[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2012, 36(6): 142–146.
WANG Hui, XU Minghai. Numerical simulation and parameter optimization for hot fluids circulation wax inhibition process[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2012, 36(6): 142–146.
- [14] 刘军, 林皋. 适用于混凝土结构非线性分析的损伤本构模型研究[J]. 土木工程学报, 2012, 45(6): 50–57.
LIU Jun, LIN Gao. Study of damage constitutive model applied to simulate nonlinear behavior of concrete structures[J]. China Civil Engineering Journal, 2012, 45(6): 50–57.
- [15] 张彦春, 胡晓波, 白成彬. 钢纤维混凝土高温后力学强度研究[J]. 混凝土, 2001, 143(9): 50–53.
ZHANG Yanchun, HU Xiaobo, BAI Chengbin. Research on mechanical strength of steel-fiber reinforced concrete after exposure to high temperature[J]. Concrete, 2001, 143(9): 50–53.
- [16] YAN Yifei, SHAO Bing, XU Jianguo, et al. Finite-element optimized back analysis of in-situ stress field and stability analysis of shaft wall in the underground gas storage[J]. Mathematical Problems in Engineering, 2016(2): 235–246.
- [17] 柏巍, 彭刚, 周丽娜, 等. 钢纤维混凝土动态特性三轴试验研究[J]. 矿业研究与开发, 2008, 28(1): 21–24.
BAI Wei, PENG Gang, ZHOU Lina, et al. Triaxial test on dynamic characteristics of steel fiber reinforced concrete[J]. Mining R&D, 2008, 28(1): 21–24.
- [18] YAN Yifei, ZHANG Lisong, YAN Xiangzhen. Push force analysis of anchor block of the oil and gas pipeline in a single-slope tunnel based on the energy balance method[J]. Plos One, 2016(3): 1–18.
- [19] 闫怡飞, 董卫, 邵兵, 等. CO₂ 和 H₂S 共存酸性环境 OCTG 材料选用研究[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2015, 39(4): 159–164.
YAN Yifei, DONG Wei, SHAO Bing, et al. Material selection of OCTG in sour environment with CO₂ and H₂S coexisting[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2015, 39(4): 159–164.
- [20] 王计敏, 闫红杰, 周子民, 等. 铝熔炼炉炉衬组合的优化模拟[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2012, 43(4): 1523–1531.
WANG Jimin, YAN Hongjie, ZHOU Jie-min. Numerical simulation and optimizing combination of aluminum melting furnace linings[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2012, 43(4): 1523–1531.
- [21] 刘铭刚, 杨秀娟, 闫相祯, 等. 催化裂化装置衬里-金属复合结构非稳态热载传热研究[J]. 炼油技术与工程, 2015, 45(7): 25–28.
LIU Minggang, YANG Xiujuan, YAN Xiangzhen, et al. Study on heat transfer of composite lining-metal structure in unstable temperature field of FCCU[J]. Petroleum Refinery Engineering, 2015, 45(7): 25–28.
- [22] 黄志凌, 金龙哲, 詹子娜, 等. 避难硐室温度计算模型及影响因素[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2015, 46(11): 4274–4280.
HUANG Zhiling, JIN Longzhe, ZHAN Zina, et al. Mathematical model and influencing factor of temperature in refuge chamber[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2015, 46(11): 4274–4280.
- [23] GB 50474—2008, 隔热耐磨衬里技术规范[S].
GB 50474—2008, Technical specification for heat-insulation and wear-resistant linings[S].

(编辑 杨幼平)